

"In-Prozessüberwachung des Schädigungsverhaltens von Metall-Kunststoff-Verbunden"

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik: Matthias Riemer, Peter Scholz

Das Anwendungsgebiet betrifft im Allgemeinen umformtechnisch verarbeitete Metall-Kunststoff-Verbunde.

Jeder Konstruktionswerkstoff hat spezifische Eigenschaften und damit Hauptanwendungsgebiete. Die steigenden Anforderungen an Bauteile bezüglich Festigkeit, Steifigkeit, Masse und Dämpfungsverhalten können von einem Werkstoff meist nicht optimal erfüllt werden. Die intelligente Kombination verschiedener Werkstoffe bietet das Potenzial, die geforderten Bauteileigenschaften umzusetzen. Dabei werden metallische Werkstoffe mit Polymeren bzw. faserverstärkten Polymeren kombiniert. Für eine großserientechnische Verarbeitung dieser hybriden Werkstoffe sind die Prozesse der klassischen Blechumformung prädestiniert. Für die Auslegung des Umformprozesses und des Bauteiles fehlen jedoch gesicherte Kenntnisse zur Beurteilung des Schädigungsverhaltens, insbesondere des Delaminationsverhaltens, von Metall-Kunststoff-Verbunden unter ein- und mehrachsigen Spannungszuständen bereits während der Bauteilherstellung bzw. Umformung.

Bei Sandwichstrukturen, wie z. B. Metall-Kunststoff-Verbunden (MKV), können Schäden im Bereich der Anbindungszone zwischen dem Kernwerkstoff und den Decklagen auftreten.

Zur Ermittlung von Versagenskriterien für monolithische Blechwerkstoffe unter mehrachsigen Beanspruchungen wird im Bereich der Blechumformung häufig das Grenzformänderungsdiagramm (FLD) eingesetzt. Der Versuchsablauf und -aufbau ist in der DIN EN ISO 12004 festgelegt. Die durch die Grenzformänderungskurve abgebildeten Versagensumformgrade können direkt mit den Ergebnissen aus der FE-Simulation verglichen werden und die Herstellbarkeit des Umformteils damit vorhergesagt werden.

Wird dieses Verfahren für Sandwichstrukturen angewendet, entspricht das ermittelte Grenzformänderungsdiagramm dem des Deckblechwerkstoffs. Dies ist darauf zurück zu führen, dass mit dem Versuchsaufbau nach DIN EN ISO 12004 nur das Versagen des Deckblechs detektiert werden kann. Eventuell auftretende Schädigungen, insbesondere Delaminationen am Interface Metall-Kunststoff, die vor dem Deckblechversagen auftreten, können nicht detektiert werden. Der FLD-Versuch ist somit in der derzeitigen Konfiguration nicht zur Bewertung von Delaminationen bei MKV geeignet. Zur Auslegung des Umformprozesses und zur Bestimmung der Verfahrensgrenzen für MKV ist dieses Wissen jedoch essentiell.

Für die Charakterisierung von Blechwerkstoffen (Tab. 1), Kunststoffen (Tab. 2), Klebeverbindungen (Tab. 3) und Verbundwerkstoffe (Tab. 4) existieren zahlreiche, genormte Prüfverfahren und Probengeometrien zur Ermittlung der Zug-, Scherzug-, Schälzug- und Biegeeigenschaften. Oft gelten jedoch vereinfachte Bedingungen, wie z. B. einachsige Zugbelastung.

Tab. 1: Ausgewählte, normierte Verfahren zur Werkstoffprüfung von Blechwerkstoffen

Norm	Titel
DIN EN ISO 6892	Metallische Werkstoffe - Zugversuch
DIN EN ISO 12004	Metallische Werkstoffe - Bleche und Bänder - Bestimmung der Grenzformänderungskurve
DIN EN ISO 20482	Metallische Werkstoffe - Bleche und Bänder - Tiefungsversuch nach Erichsen

Tab. 2: Ausgewählte, normierte Verfahren zur Werkstoffprüfung von Kunststoffen

Norm	Titel
DIN EN ISO 178	Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften
DIN EN ISO 527	Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften
DIN EN ISO 604	Kunststoffe - Bestimmung der Druckeigenschaften

Tab. 3: Ausgewählte, normierte Verfahren zur Werkstoffprüfung von Klebeverbindungen

Norm	Titel
DIN EN 1465	Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebung
DIN EN 1464	Klebstoffe - Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen - Rollenschälversuch
ISO 11003-2	Klebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen
DIN EN 15870	Klebstoffe - Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebung
DIN EN 28510	Klebstoffe - Schälprüfung für flexibel/starr geklebte Proben

Tab. 4: Ausgewählte, normierte Verfahren zur Werkstoffprüfung von Werkstoffverbunden / Verbundwerkstoffen

Norm	Titel
DIN 53290	Prüfung von Kernverbunden; Begriffe
DIN 53291	Prüfung von Kernverbunden; Druckversuch senkrecht zur Deckschichtebene
DIN 53292	Prüfung von Kernverbunden; Zugversuch senkrecht zur Deckschichtebene
DIN 53293	Prüfung von Kernverbunden; Biegeversuch
DIN 53294	Prüfung von Kernverbunden; Schubversuch
DIN EN 2377	Luft- und Raumfahrt; Glasfaserverstärkte Kunststoffe; Prüfverfahren zur Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit
DIN EN 2561	Luft- und Raumfahrt - Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe - Unidirektionale Lamine - Zugprüfung parallel zur Faserrichtung
DIN EN 2563	Luft- und Raumfahrt - Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe - Unidirektionale Lamine; Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit
DIN EN 2597	Luft- und Raumfahrt - Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe; unidirektionale Lamine - Zugversuch senkrecht zur Faserrichtung
DIN EN 2746	Luft- und Raumfahrt - Glasfaserverstärkte Kunststoffe - Biegeversuch, Dreipunktverfahren
DIN EN 2747	Luft- und Raumfahrt - Glasfaserverstärkte Kunststoffe - Zugversuch
DIN EN 6031	Luft- und Raumfahrt - Faserverstärkte Kunststoffe - Prüfverfahren - Bestimmung der Schubeigenschaften ($\pm 45^\circ$ -Zugversuch)
DIN EN ISO 14125	Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften
DIN EN ISO 14126	Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Druckeigenschaften in der Lamineebene
DIN EN ISO 14130	Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken
DIN EN ISO 527-4	Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe
DIN EN ISO 527-5	Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe

Um das Interfaceversagen zwischen Deckblech und Kernwerkstoff vorhersagen zu können, erfolgt aktuell eine direkte Modellierung des Interface mit entsprechenden Versagensmodellen. Zur Parametrisierung und Kalibrierung dieser Modelle, müssen auf

Basis experimenteller Daten (aus z. B. Kopfzugversuch, Scherzugversuch, Biegeversuch) mittels mathematischer Optimierung die Modellparameter ermittelt werden. Zusätzlich sind diese Modelle numerisch sehr aufwendig und erhöhen die Rechenzeit drastisch.

Eine weitere Möglichkeit ist die Durchführung von FLD-Versuchen mit verschiedenen vordefinierten Ziehtiefen. Anschließend erfolgt eine zerstörende Prüfung (Trennen und gekühltes Schleifen) und eine mikroskopische Analyse des Interfaces. Um eine hohe Auflösung zu erzielen, müssen jedoch eine Vielzahl von Ziehtiefen untersucht werden. Dies ist mit einem sehr hohen materiellen und experimentellen Aufwand verbunden.

Im Rahmen eines Vorhabens der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) wurden zwei Prüfverfahren zum Nachweis von Delamination entwickelt [1]. Das sind zum einen der Streifentiefziehversuch mit Zug-Druck-Belastung und zum anderen ein Versuchsaufbau zur mehrachsigen Delaminationsprüfung. Nachfolgend werden beide Verfahren beschrieben.

Streifentiefziehversuch mit Zug-Druckbelastung [1]

Um eine zerstörungsfreie Prüfung auf Delamination durchzuführen, wurden unterschiedlich breite Streifen in einem runden Napfwerkzeug umgeformt und anschließend in Bereich der Verbunddicke optisch analysiert (Abb. 1). Durch die offene Geometrie wurden deutlich niedrigere Druckspannungen als beim runden Napf übertragen. Für eine Umformung im Grenzbereich wurde deshalb das Durchmesserverhältnis auf 2,3 erhöht.

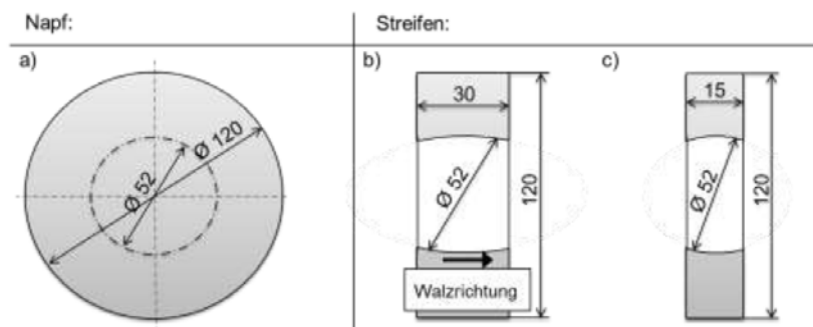


Abb. 1: Streifentiefziehversuch [1]

Mehrachsige Delaminationsprüfung [1]

Der neu entwickelte Versuchsaufbau (Abb. 2) lehnt sich an den Versuchsaufbau von Marciniak in DIN EN ISO 12004-2 an. Bei dem Prüfverfahren für Verbundplatten wird über ein Deckblech eine biaxiale Streckziehbelastung eingeleitet und somit die Zwischenschicht ausschließlich auf Schub belastet. Der runde Flachstempel besitzt einen Durchmesser von 100 mm und einen integrierten Piezosensor für die senkrechte Stempelkraftmessung. Die eingelegte Probe wird unter möglichst geringer Reibung am Stempel gestreckt. Mit einem optischen Messsystem kann die Formänderung auf der Oberseite (im Prozess) sowie auf der Unterseite (mit einer Vermessung nach der Bauteilentnahme) der Platine erfolgen.

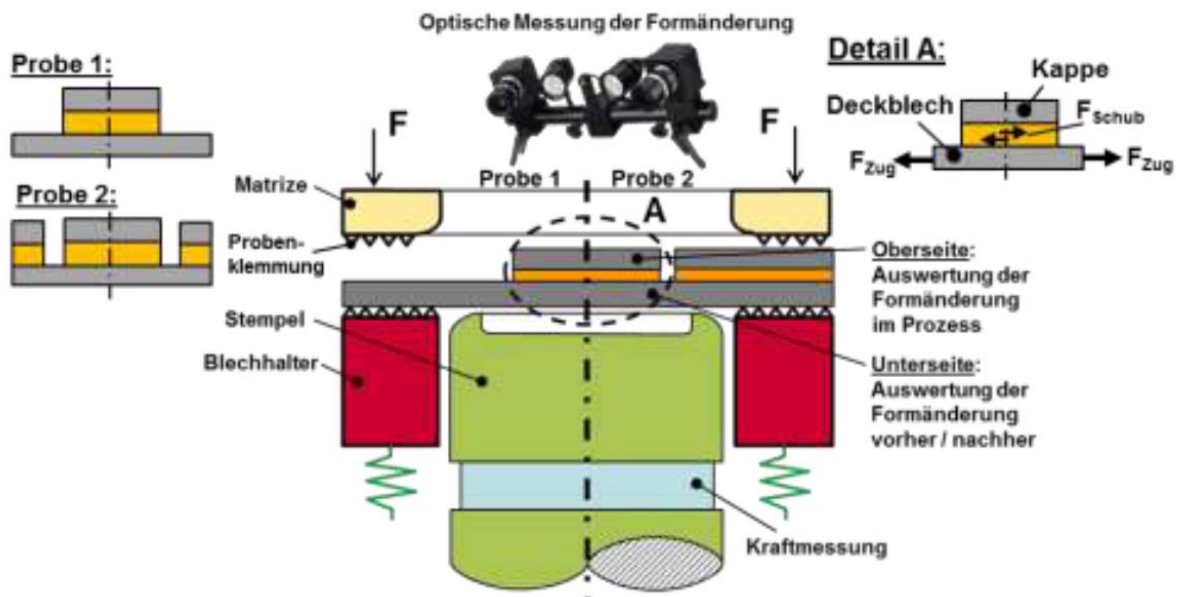


Abb. 2: Versuchsaufbau und Probendesign der Delaminationsprüfung [1]

Die Dehnung des unteren Deckbleches schreitet durch die Werkstoffverfestigung bei beiden Probengeometrien bis zum Umfang der Kappe fort. Dort wird sie bei einer wirkenden Schubkraft in der Zwischenschicht gebremst. Wird die Schubkraft überwunden, tritt Delamination auf. Das Prüfverfahren wird durch einen Reißer des unteren Deckbleches oder durch einen begrenzten Ziehweg beendet. Zur Bewertung der Delamination kann die ebene Formänderung auf dem unteren Deckblech verwendet werden. Außerdem wird durch die unterschiedliche Delamination in x- und y-Richtung der anisotrope Einfluss der Deckbleche deutlich.

Abschließend gilt es festzuhalten, dass Verbundwerkstoffe unter mehrachsiger Belastung mit diesem Versuch reproduzierbar untereinander verglichen und Qualitätsunterschiede innerhalb einer Charge deutlich gemacht werden können. Da die Maximalkraft durch das Streckziehen des Deckbleches beeinflusst und die instabile Einschnürung bei Riss nicht immer exakt reproduzierbar ist, kann ein spannungsbasierter Kennwert nicht direkt ermittelt werden. Zur Bewertung von Umformsimulationen scheint eine dehnungsbasierte Grenzkurve vielversprechend zu sein und wird in weiterführenden Arbeiten über eine Taillierung der Proben ermittelt und an realen Bauteilen überprüft.

Zerstörungsfreie Prüfung Faserverbundwerkstoffen

Für die zerstörungsfreie Prüfung von glas- oder kohlenstofffaserverstärkten Verbundmaterialien kommen hauptsächlich die in Tab. 5 aufgeführten Prüfmethode zum Einsatz. Eine Vielzahl dieser Technologien findet ihre Anwendung in der Luftfahrt bei der Qualitätsprüfung in der Fertigung bzw. bei der wiederkehrenden Prüfung zur Instandhaltung.

Tab. 5: Auswahl zerstörungsfreier Prüfmethode für Faserverbundwerkstoffe [2]

Prüfmethode	Anwendungsgebiet	Anmerkungen
-------------	------------------	-------------

Ultraschall	CFK-Laminate	<ul style="list-style-type: none"> - Einkopftechnik - Gruppenstrahlertechnik - Schallankopplung in Kontakttechnik oder Wasserstrahlankopplung - Impuls-Echo-Technik - Durchschallung - Schwerpunkt liegt auf Erzielung einer hohen Prüfgeschwindigkeit
Thermografie	Faserlamine	<ul style="list-style-type: none"> - Aufheizen mittels Infrarotquellen mit anschließender Wärmebildanalyse - Impuls-Thermografie - Lock-In-Thermografie
Wirbelstromprüfung	CFK-Laminate	<ul style="list-style-type: none"> - oberflächennah bzw. auf dünne Schichten beschränkt - Zweifrequenzprüfung für verschiedene für versch. Eindringtiefen
Structural Health Monitoring	kontinuierliche und selbstständige Überwachung durch permanent applizierte/integrierte Sensorsysteme	<ul style="list-style-type: none"> - aktive / passive Systeme - Fiber Bragg Gratings (FBG) - Comparative Vacuum Monitoring (CVM) - Acousto-Ultrasonics (AU) - Acoustic Emission (AE) - Eddy Current Testing Foil Sensors (ETFS) - Microwave Antennas (MWA) - Crack Wires - Strain Gages

Patente / Gebrauchsmuster

Tab. 6: Ausgewählte Patente / Gebrauchsmuster für die Prüfung von Verbundwerkstoffen / Werkstoffverbunden auf Delaminationen

Patent-Nr.	Inhaber	Titel
EP000002175264A3	BOEING CO, US	Thermografisches Verfahren zur Detektion von Delaminationen in Verbundwerkstoffen unter Verwendung resistiver Erwärmung durch Durchflutung des Verbundwerkstoffs mit elektrischem Strom
FR000002996917A1	AIRBUS OPERATIONS SAS, FR	Method for determining appearance of defect in composite material panel during drilling operation, involves determining appearance of chipping and/or delamination at emerging end of hole based on acoustic waves detected during drilling
CN000103605865A	UNIV BEIHANG	Delamination propagation behavior simulation method of composite material multidirectional laminated plate on basis of cohesion model
CS000008900041A1	ZAVADIL ZBYNEK, CS ; BLAHUSEK JIRI, CS	DEVICE FOR COMPOSITE PARTS' DELAMINATION DETERMINATION
JP002007033058A	MITSUBISHI HEAVY IND LTD	METHOD OF DETECTING DELAMINATION FOR COMPOSITE PANEL AND ITS DEVICE
PL000000387685A1	ADAPTRONICA SPO & LSTROK KA Z, PL ; CONTEC A HOLNICKI W SZA &	Method of detection the delamination of composite structures, and the system for detection of the delamination of composite structures

	LSTR, PL		
US020130213137A1	OSTAPENKO SERGEI, US	METHOD AND APPARATUS FOR DETECTING CRACKS AND DELAMINATION IN COMPOSITE MATERIALS	

Kern der Erfindung ist die Kombination des in DIN12004 beschriebenen Verfahrens zur Aufnahme des Grenzformänderungsdiagramms mit einem zerstörungsfreien thermografischen Prüfverfahren zur Detektion des Interfaceversagens in Abhängigkeit der Deckblechdehnung (Abb. 3). Dabei erfolgt die zerstörungsfreie Prüfung des Interfaces inline während der zerstörenden Prüfung des Verbundes. Das Aufheizen der Komponente erfolgt mit einer Infrarotquelle und anschließender Wärmebildanalyse. Kommt es während der Umformung zu einem Interfaceversagen, so wird davon ausgegangen, dass es an der Stelle des Versagens zu einer Änderung der emittierten Wärmemenge kommt. Diese Änderung wird detektiert und mit den Dehnungswerten der optischen Formänderungsanalyse in Verbindung gebracht.

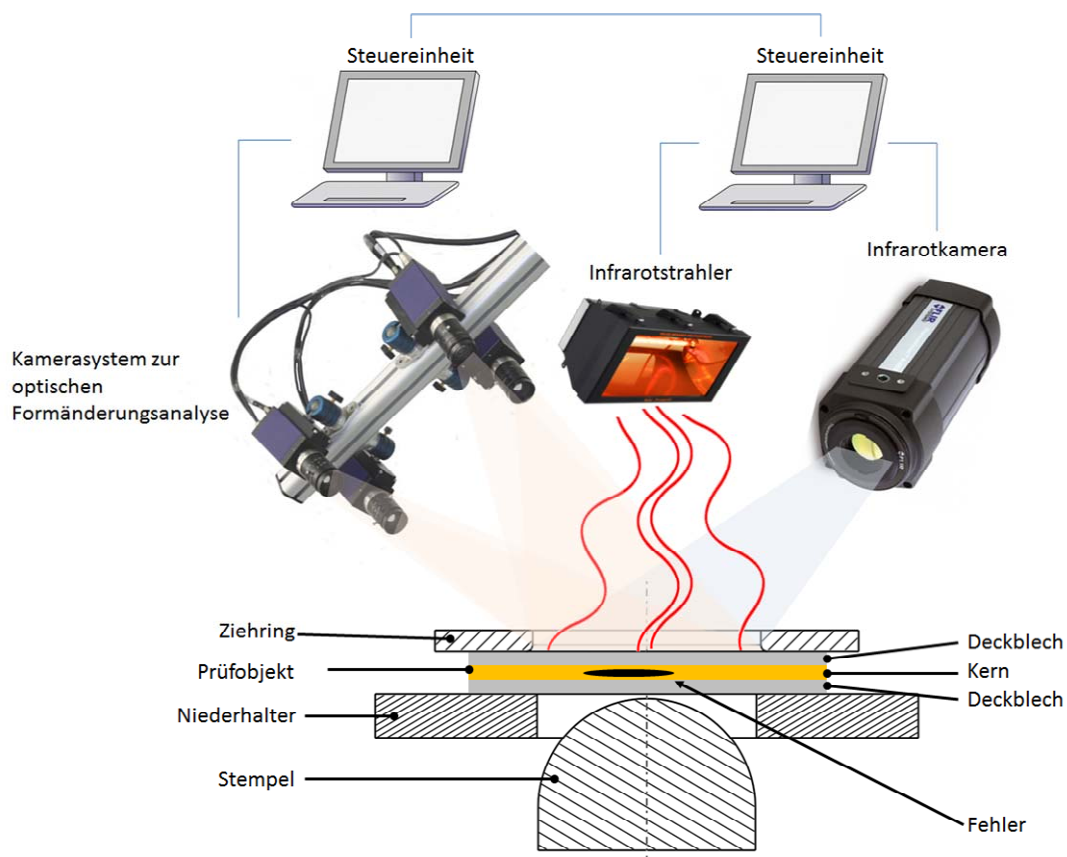


Abb. 3: Versuchsaufbau der Erfindung zur inline-Delaminationsprüfung

Erfindungsgemäß ergeben sich u.a. folgende Vorteile:

- Ermittlung eines Zusammenhangs zwischen Deckblechdehnung und Interfaceversagen
- Verringerung des experimentellen Aufwands zur Verbundcharakterisierung
- Verringerung des Aufwands zur Erstellung von Simulationsmodellen

[1] Liewald, M.; Wagner, S.; Bolay, C.; Planck, H.; Gresser, G.; Stegmeier, T.; Vohrer, A.: Innovative Blechverbundwerkstoffe mit textiler Einkage für den Karosseriebau. EFB-Forschungsbreicht Nr. 379, EFB, Hannover, 2013.

[2] Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung. Carl-Hanser-Verlag, München, 2011.